PLANIFICACIÓN DE LOS RECURSOS HIDRÁULICOS CON FINES DE RIEGO EN LA ZONA ANDINA DEL ECUADOR

PLANNING OF HYDRAULIC RESOURCES IN THE ANDINA ZONE OF ECUADOR

Aníbal **González-González**[1], Oscar **Palacios-Vélez**[2], Enrique **Palacios-Vélez**[2], Jesús **Chávez-Morales**[2] y Rolando **Springall-Galindo**[3]

[1]Universidad Nacional de Loja, Ecuador. Instituto de Investigaciones Agrícolas. [2]Especialidad de Postgrado en Hidrociencias, IRENAT. Colegio de Postgraduados. 56230, Montecillo, Edo. de México. (opalacio@colpos.colpos.mx). [3]Basin, S. A. de C. V.. Calzada Las Aguilas 412. 01710, Colonia Las Aguilas. México, D. F. (basin@mexis.com).

Resumen

La planificación del aprovechamiento, con fines de riego, de pequeños escurrimientos sin información hidrométrica ni del consumo de agua de los cultivos, fue analizada mediante un estudio de caso en la cuenca "La Capilla", ubicada en la provincia de Loja, al sur del Ecuador. En el estudio se estimaron, mediante métodos indirectos, las disponibilidades de agua para riego y las demandas hídricas mensuales de los cultivos. Asimismo, después de realizar un análisis de intensidad-magnitud-periodo de retorno-duración y frecuencia de las lluvias, se seleccionó la tormenta de diseño y después de restarle las pérdidas por infiltración se calculó el exceso de precipitación, con el cual se determinó la avenida máxima de diseño. Finalmente, se determinó la capacidad de almacenamiento necesaria para satisfacer la demanda de los cultivos, mediante simulación de la operación del almacenamiento. Se concluyó que las metodologías aplicadas, apoyadas en programas de cómputo, son herramientas útiles para auxiliar en la toma de decisiones a los responsables de la planificación de los recursos hidráulicos en esta zona del Ecuador.

Palabras clave: Avenida máxima, cuencas pequeñas, demandas hídricas de cultivos, hidrología, programas de cómputo.

Introducción

El crecimiento de la población, así como la necesidad de mejorar su nivel de vida, demandan una mayor producción de alimentos en varias partes del mundo, principalmente en América Latina. Con frecuencia el agua, más que el suelo, es el elemento natural que restringe la producción agrícola, por lo que resulta imperativo hacer una planificación eficaz de su aprovechamiento. Para hacer producir la tierra, además de los problemas de financiamiento, la dificultad más común es la falta de información sobre la disponibilidad y demanda del recurso hídrico.

Recibido: Marzo, 1998. Aprobado: Agosto, 2000.
Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 35: 1-12. 2001.

Abstract

A case study for planning the use of water resources for irrigation was conducted at "La Capilla" basin, located in South Ecuador's Province of Loja; where no information is available on runoff and crop water consumption. Monthly water availability and crop demand were estimated using indirect methods. The design storm was selected after performing a rainfall intensity-depth-return period-duration and frequency analysis. Rainfall excess was determined by subtracting infiltration losses; then, maximum flood discharge was calculated. Finally, reservoir capacity needed to satisfy water requirements of crops was obtained by simulation of reservoir operation. The methodologies used, supported by computer programs, are useful tools that help the decision-making process, done by officials responsible for planning water resources use, for small watersheds in this area of Ecuador.

Key words: Maximum flood discharge, small watersheds, water consumption by crops, hydrology, computer programs.

Introduction

Population growth, and the need to improve people's quality of life demand greater food production in several areas of the world such as in Latin America. Frequently water, more than soil, is the restricting natural element for agricultural production; this is why it is necessary to effectively plan water use. Aside of financing problems, the most common problem in agriculture is the lack of information about water resources availability and demand.

Ecuador's agricultural zones usually do not have information available about runoff. Climatological information consists of only a few rainfall, evaporation, and temperature data. Similarly, crop water requirements have not been experimentally determined; and it is necessary to estimate them using potential evapotranspiration or a reference crop. The study of runoff and crop water requirements in areas lacking climatological information is not very precise. As a consequence, hydraulic infrastructure has been designed

Las áreas agrícolas del Ecuador generalmente no disponen de información sobre escorrentía; la información climatológica se reduce a algunos registros de precipitación, evaporación y temperatura. De igual forma los requerimientos hídricos de los cultivos no han sido determinados experimentalmente, por lo cual es necesario estimarlos a través del concepto de evapotranspiración potencial o de un cultivo de referencia. El estudio de la escorrentía y de los requerimientos hídricos de los cultivos en estas áreas con poca información es poco preciso, lo que ha traído como consecuencia que se hayan diseñado y construido obras de infraestructura hidráulica con base en estimaciones incorrectas, que han incidido en el incremento de los costos de los sistemas de riego. Al respecto, Hendricks (1994) señala que en la región andina ecuatoriana se han cometido errores técnicos en el diseño de los sistemas de riego, debido a la utilización de métodos importados y obtenidos para otras condiciones naturales, por lo que existe una impresión generalizada de que varios sistemas de riego no han logrado alcanzar los objetivos para los que fueron concebidos.

Esta investigación estuvo orientada a seleccionar y adaptar metodologías sencillas, provenientes de diversas fuentes de información, para auxiliar a los técnicos de campo en la estimación del potencial hidráulico con fines de riego, en pequeñas cuencas, que no cuentan con información hidrométrica y de consumo de agua de los cultivos, como es la Zona Andina del Ecuador. Por otra parte, para diseñar obras de seguridad de la infraestructura hidráulica se presentan métodos para estimar las avenidas máximas en sitios de interés. El estudio de caso se efectuó en la microcuenca "La Capilla", ubicada en la provincia de Loja, al sur del Ecuador.

La planificación de los recursos hidráulicos

Según la FAO (1992), las cuencas hidrográficas constituyen las unidades geográficas idóneas para planificar el desarrollo socioeconómico de una región y el uso racional y sostenido de los recursos naturales básicos: suelo, agua y vegetación. Dentro de ellas, a medida que las presiones de desarrollo y la población aumentan, la planificación de los recursos hidráulicos con fines de riego se ha convertido en un campo de investigación importante. Palacios (1989) señala que esta planificación involucra un balance entre los volúmenes de agua estimados disponibles y los volúmenes necesarios para satisfacer las demandas de los usuarios.

Springall (1990) manifiesta que como generalmente no existen estaciones de aforo en cuencas pequeñas, la estimación de los escurrimientos tiene que hacerse, en la mayoría de los casos, mediante métodos empíricos, los cuales utilizan solamente datos de precipitación. Entre los procedimientos más generalizados, flexibles y fáciles

and built based on incorrect estimations, raising the cost of irrigation systems. Hendricks (1994) has pointed out that in Ecuador's Andean region technical errors have been made when designing irrigation systems, due to the use of imported methodologies designed for other natural conditions. This is why there is a common conception that several irrigation systems have not been able to fulfill the purpose they were conceived for.

The present work was oriented to select and adapt simple methods, from different information sources, to help field technicians to estimate potential water resources for irrigation in small basins, like Ecuador's Andean Zone; which lacks hydrometric and crop water consumption information. Also, methods to estimate maximum flood discharge in order to design safety structures for current hydraulic infraestructure are presented. The case study was carried out in the microbasin "La Capilla", located in South Ecuador's Province of Loja.

Planning of water resources

According to FAO (1992), hydrographic basins are ideal geographic units for planning a region's social and economical development and the rational and sustained use of its basic natural resources: soil, water, and vegetation. Within these basins, as development and population pressures increase, planning of water resources for irrigation purposes has become an important field of study. Palacios (1989) pointed out that planning involves a balance between available and necessary water volumes to satisfy users' demands.

Springall (1990) indicates that, since there are usually no water measurement stations in small basins, runoff estimation has to be made mostly through empirical methods which use only rainfall data. Among the procedures most generally accepted, flexible and easy to adapt, stand out the Runoff Coefficients (SARH, 1978), the Ecological Polynomial (Gómez, 1990), and the INERHI (1991) methods.

Rainfall analysis is extremely important when there are no stream discharge measurements to be analyzed. Rainfall record analysis to estimate the design maximum flood discharge for a hydraulic structure is done by characterizing storms in terms of their return period (SARH, 1978). Although several methods are currently available for estimating maximum flood discharge, none has been adopted unanimously; which, in turn, emphasizes the importance and complexity of the hydrological problem involved in estimating a flood discharge. Then it is necessary to study this problem using different methods, so one may have at hand a series of results that could be used to accurately define the magnitude of the estimated flood discharge within a selection and rejection process (Springall, 1968).

de adaptar destacan los métodos de los coeficientes de escurrimiento (SARH, 1978), el del polinomio ecológico (Gómez, 1990) y el del INERHI (1991).

El análisis de lluvias es de importancia fundamental cuando no existen aforos de la corriente que se está analizando. El análisis de los registros de lluvia para estimar la avenida máxima de diseño de una estructura hidráulica, es a través de la caracterización de las tormentas en relación con su periodo de retorno (SARH, 1978). Aunque en la actualidad se dispone de numerosos métodos para estimar las avenidas máximas, ninguno de ellos se ha adoptado unánimemente, lo cual enfatiza la importancia y complejidad del problema hidrológico en la estimación de una avenida, por lo que es necesario estudiar el problema mediante distintos métodos y disponer de una serie de resultados, con base en los cuales y en un proceso de selección y rechazo se podrá definir la magnitud de la avenida estimada con mayor seguridad (Springall, 1968).

Requerimientos hídricos de los cultivos

En la zona de estudio los requerimientos hídricos de los cultivos no han sido determinados experimentalmente, por lo que se requiere estimarlos mediante el concepto de evapotranspiración potencial o de referencia. Al respecto existen varios métodos empíricos. Uno de los más completos, que considera el balance de energía, es el propuesto por Penman, modificado por Doorenbos y Pruitt (1977); pero al observar que en ciertas condiciones sobrestimaba las evapotranspiración, la FAO (1995) propuso el método de Penman-Monteith como herramienta para estimar la evapotranspiración de los cultivos en zonas en las que se dispone de datos sobre temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y las horas de fuerte insolación o nubosidad (Aguilar *et al*., 1995).

Además, existen varios programas de cómputo que sirven para determinar las demandas hídricas de los cultivos a través del método de Penman-Monteith. Uno de los más utilizados y recomendados por la FAO es el *CROPWAT*, útil para la planificación y el manejo de sistemas de riego (FAO, 1995).

Materiales y Métodos

La cuenca del río "La Capilla" se ubica al sur del Ecuador, aproximadamente a 20 km al suroeste de la ciudad de Loja, capital de la Provincia de Loja. La superficie total de la microcuenca es de 38.6 km^2. La longitud total del río es 18.3 km. La pendiente media del cauce, obtenida mediante la fórmula de Taylor y Schwarz, es de 9.1%. La topografía de la cuenca es irregular, predominando los terrenos con pendientes pronunciadas (57%); las áreas planas son escasas. La media anual de precipitación es 796.3 mm y la de temperatura 20.2 ºC.

Crop water requirements

Crop water requirements have not been determined experimentally in the study area, so it is necessary to estimate them using potential evapotranspiration or evapotranspiration from a reference crop. Several empirical methods exist for this purpose. The method proposed by Penman, modified by Doorenbos and Pruitt (1977), which considers an energy balance, is one of the most complete. However, under certain conditions, it overestimates evapotranspiration; thus FAO (1995) proposed the Penman-Monteith method as a tool to estimate crop evapotranspiration in zones where temperature, relative humidity, wind velocity, and hours of strong sunlight or cloudiness data are available (Aguilar *et al*., 1995).

In addition, there are several computer programs available to determine crop water demands using the Penman-Monteith method. The most popular method, also recommended by FAO, is CROPWAT; which is useful for planning and managing irrigating systems (FAO, 1995).

Materials and Methods

"La Capilla" river basin is located south of Ecuador, approximately 20 Km southwest of the City of Loja, capital city of the Province of Loja. The total microbasin surface is 38.6 Km^2. The total river length is 18.3 Km. The Taylor and Schwarz formula estimated an average riverbed slope of 9.1%. The basin topography is irregular with prevalence of prominent slopes (57%); flat areas are scarce. The average annual rainfall is 796.3 mm and the average temperature is 20.2 ºC.

Climatological information from a 27-year period (1964 to 1990) was available from four weather stations surrounding the basin, and it was gathered by the Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) and the Dirección de Aviación Civil del Ecuador (DAC). Two-year data on rainfall, evaporation, and river flow in the basin were also available (UNL, 1993).

The crop pattern was taken from the Plan Integral de Desarrollo de los Recursos Hídricos para la Provincia de Loja; done by the OEA (1994) in coordination with other Ecuadorian institutions in 1992 (Table 1).

The methodology applied in this research is summarized in Figure 1.

Water availability for irrigation

Physical characteristics of the watershed contributing area were determined initially: the surface is approximately 2100 ha, the river flow length is 7880 m, and the average slope, obtained using Taylor and Schwarz formula, is 10.9%. Next, information from neighbor weather stations was used to estimate weighted average monthly rainfall for the watershed contributing area. This estimate was based on the rainfall gradient from four weather stations surrounding the watershed area and three stations installed within the basin. "La Argelia" weather

Se dispuso de información climatológica de cuatro estaciones que rodean la cuenca para un periodo de 27 años (1964 a 1990), obtenida del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y de la Dirección de Aviación Civil del Ecuador (DAC). Además se dispuso de dos años de información sobre precipitación, evaporación y caudales registrados en la cuenca (UNL, 1993).

El patrón de cultivos fue tomado del Plan Integral de Desarrollo de los Recursos Hídricos para la Provincia de Loja, hecho por la OEA (1994) en coordinación con otras instituciones del país en 1992 (Cuadro 1).

La metodología aplicada en esta investigación, se resume en la Figura 1.

Disponibilidades de agua para riego

Inicialmente se determinaron las características físicas del área de captación: la superficie es de aproximadamente 2100 ha, la longitud del cauce es de 7880 m y su pendiente media, obtenida mediante la fórmula de Taylor y Schwarz, es de 10.9%. A continuación, con la información de las estaciones vecinas, se ponderó la precipitación media mensual para la cuenca de captación con base en el gradiente pluviométrico de las cuatro estaciones circundantes y las tres instaladas dentro de la cuenca. Se tomó como estación base "La Argelia", que según los polígonos de Thiessen es la que más influye en esta zona (Figura 2).

Con la precipitación ponderada para el área de captación se calculó el escurrimiento mediante los métodos: a) Criterio de los coeficientes de escurrimiento (SARH, 1978); b) Método del polinomio ecológico (Gómez, 1990) y c) Método del INERHI (1991). Para tener un criterio del método a elegir para continuar la planificación, los tres métodos se aplicaron en toda la cuenca (36.8 km^2). Luego se eligió el método que presentó un comportamiento similar a los valores registrados a la salida de la cuenca. Finalmente, los volúmenes escurridos, calculados por el método seleccionado, fueron ajustados a una distribución log-normal. Los volúmenes esperados a 50% de probabilidad se constituyeron en los volúmenes aprovechables mensuales.

Avenida máxima de diseño

En este caso, al no disponerse de una estación hidrométrica, la metodología empleada correspondió a un análisis de lluvias ligadas a periodos de retorno. Para esto se utilizaron los registros pluviográficos de la estación "La Argelia". La información del pluviógrafo se procesó utilizando técnicas conocidas (Springall,1990), que consisten en

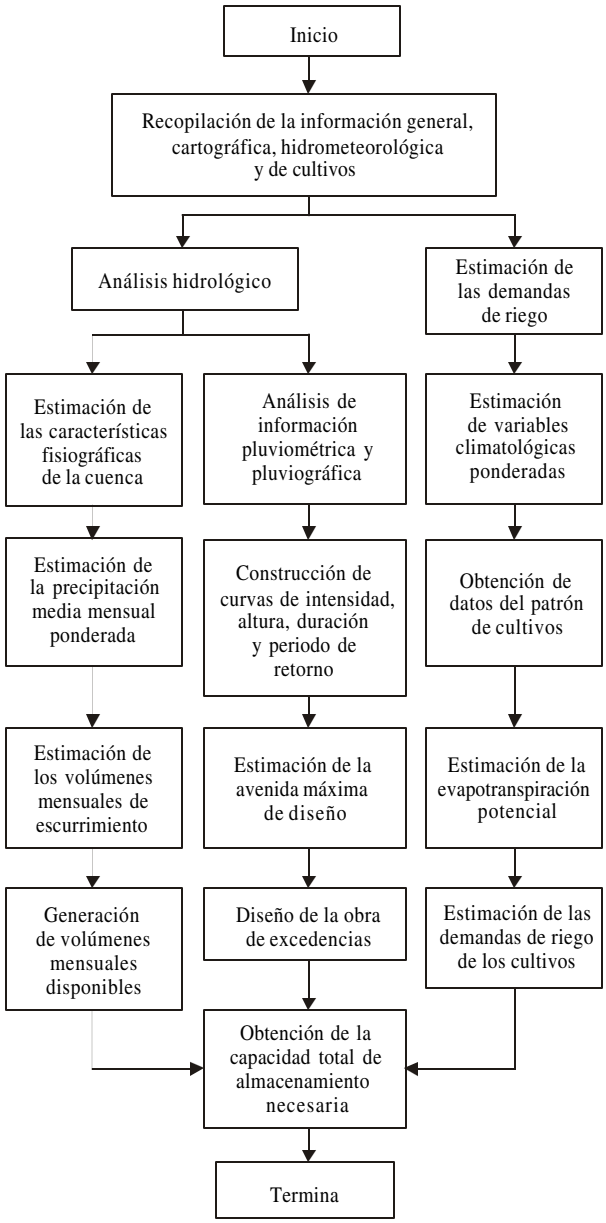
Inicio
Recopilación de la información general, cartográfica, hidrometeorológica y de cultivos
Análisis hidrológico
Estimación de las demandas de riego
Estimación de las características fisiográficas de la cuenca
Análisis de información pluviométrica y pluviográfica
Estimación de variables climatológicas ponderadas
Estimación de la precipitación media mensual ponderada
Construcción de curvas de intensidad, altura, duración y periodo de retorno
Obtención de datos del patrón de cultivos
Estimación de los volúmenes mensuales de escurrimiento
Estimación de la avenida máxima de diseño
Estimación de la evapotranspiración potencial
Generación de volúmenes mensuales disponibles
Diseño de la obra de excedencias
Estimación de las demandas de riego de los cultivos
Obtención de la capacidad total de almacenamiento necesaria
Termina

Figura 1. Diagrama de flujo, donde se muestran los principales procesos y etapas del estudio.
Figure 1. Flowchart depicting the main processes and stages of the study.

Cuadro 1. Patrón y épocas de establecimiento de cultivos en la región de estudio.
Table 1. Crop Pattern and establishing time in the study area.

Cultivos	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.)	═		═	═	═	═			═	═	═	═
Papaya (*Carica papaya* L.)	═	═	═	═	═	═	═	═	═	═	═	═
Aguacate (*Persea americana*)	═	═	═	═	═	═	═	═	═	═	═	═
Forraje y abono verde	═	═	═	═	═	═	═	═	═	═	═	═

Fuente: OEA (1994).

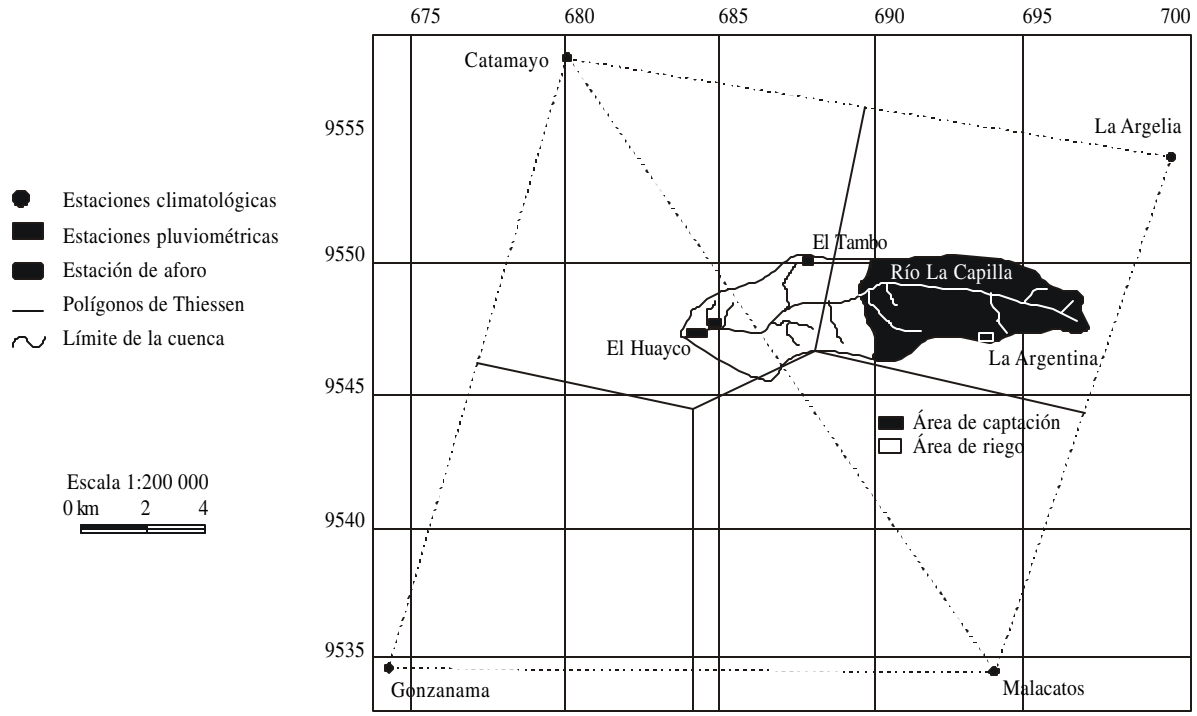

Figura 2. Ubicación de las estaciones consideradas y polígonos de Thiessen respectivos.
Figure 2. Location of weather stations and their respective Thiessen polygons.

agrupar las alturas o láminas de lluvia de diferente duración (5, 10, 15, 20 , 25, 30, 60 y 120 min), de acuerdo con su periodo de retorno, calculado mediante la fórmula de Weibull (SARH, 1978), para finalmente deducir, a través de un análisis de correlación múltiple, una expresión del tipo:

$$hp = \gamma\, T^{\alpha}\, d^{\beta} \qquad (1)$$

donde hp es la altura o lámina de lluvia, en mm; T es el periodo de retorno, en años; d es duración de la tormenta, en min; y α, γ y β son parámetros estimados a través del análisis de correlación.

Paralelamente, con el propósito de corroborar la Ecuación 1, se analizó la información pluviométrica registrada en las estaciones climatológicas consideradas para este estudio: "La Argelia", "Malacatos", "Gonzanamá" y "Catamayo". Esta información se ordenó en series excedentes anuales. Para calcular el periodo de retorno se utilizó la fórmula de Weibull (SARH, 1978). A la información de cada estación climatológica analizada se ajustó un modelo de regresión simple, para obtener una ecuación del tipo:

$$hp_{m,d} = \gamma\, T^{\beta} \qquad (2)$$

donde $hp_{m,d}$ es la altura o lámina de lluvia media correspondiente a una duración de tormenta d, en mm; T es el periodo de retorno, en años.

Con esta información, mediante interpolación visual se elaboró el plano de isoyetas y se determinó la precipitación máxima promedio para estas condiciones. Con este valor se modificó la Ecuación 1, que

station was defined as the central base station since, according to Thiessen's polygons, it had the most influence in the zone (Figure 2).

Weighted rainfall for the watershed contributing area was used to calculate runoff with the methods: a) runoff coefficients criterion (SARH, 1978); b) ecological polynomial (Gómez, 1990), and c) INERHI (1991). The three methods were applied in all the basin (36.8 Km^2) to obtain a criterion to choose a planning method. Later, the best method was selected by comparing predicted and recorded values at the basin's outlet. Finally, runoff volumes,calculated using the selected method, were adjusted to a log-normal distribution. Expected volumes at 50% probability became useful monthly volumes.

Maximum flood discharge

The methodology employed was an analysis of rainfalls linked to return periods; since no hydrometric station was available in this case. Pluviographic records from "La Argelia" station were used. Pluviograph information was processed using well known techniques (Springall, 1990) consisting of grouping rainfall depths of different time lengths (5, 10, 15, 20, 25, 30, 60 and 120 minutes) according to their return period, calculated by the Weibull formula (SARH, 1978). Then, by multiple correlation analysis, the following type of expression was deduced.

$$hp = \gamma\, T^{\alpha}\, d^{\beta} \qquad (1)$$

where hp is the rainfall depth in mm; T is the return period in years; d is the storm duration in minutes; and α, γ and β are parameters estimated by correlation analysis.

finalmente se convirtió en la tormenta de diseño a utilizar. Una vez definida la tormenta de diseño, se procedió a aplicar el método del Hidrograma Unitario Triangular, propuesto por el Bureau of Reclamation (SARH, 1978) y el método empírico de Ven Te Chow (Aparicio, 1997).

Requerimientos hídricos de los cultivos

La precipitación media mensual se ponderó con base en el gradiente pluviométrico de la zona de riego. La estación base fue la de "Catamayo". La evapotranspiración potencial se estimó mediante el método de Penman-Monteith. Para simplificar el proceso de cálculo, se utilizó el programa de cómputo CROPWAT, por medio del cual se determinaron los requerimientos hídricos de los cultivos.

Estimadas las disponibilidades de agua para riego y las demandas por parte de los cultivos, se efectuó el balance respectivo y se determinó el área posible a beneficiar. Luego se construyeron las curvas masa de demandas y aportaciones, las cuales permitieron determinar el volumen del embalse requerido, que fue ajustado por medio de la simulación del funcionamiento del embalse.

RESULTADOS

Estimación de disponibilidades

El modelo de regresión aplicado entre la precipitación media mensual (Y) y la altitud (X) de las estaciones vecinas e instaladas dentro de la cuenca fue:

$$Y = 0.477\,X - 110.02 \qquad (3)$$

El alto valor alto del coeficiente de determinación obtenido (r^2=0.92) evidencia una dependencia estadística, en esta zona, entre la precipitación y la altitud. Al aplicar la Ecuación 3 y con base en los datos de la estación "La Argelia", se determinó la precipitación media mensual ponderada *(Pp)* para el área de captación (Cuadro 2), aplicándose los métodos para estimar los volúmenes escurridos

Simultaneously, in order to verify Equation 1 pluviometric information recorded from "La Argelia", "Malacatos", "Gonzanamá", and "Catamayo" weather stations was analyzed. This information was ordered in annual excess series. Weibull's formula was used to calculate the return period (SARH, 1978). A simple regression model was fitted to data from each weather station to obtain an equation of the type,

$$hp_{m,d} = \gamma\, T^{\beta} \qquad (2)$$

where $hp_{m,d}$ is the average mean rainfall depth, in mm, corresponding to a d storm duration; T is the return period in years.

Based on the previous information, an isohyet map was constructed by visual interpolation, and average maximum rainfall was determined for these conditions. Once the design storm was defined, the Triangular Unit Hydrograph, proposed by the Bureau of Reclamation (SARH, 1978) and the Ven Te Chow empirical method (Aparicio, 1997) were applied.

Crop water requirements

Average monthly rainfall was obtained based on the pluviometric gradient of the irrigation zone. The base station was the "Catamayo" weather station. Potential evapotranspiration was estimated using the Penman-Monteith method. The calculation process was simplified by the CROPWAT computer program; which determines crop water requirements.

Once water availability for irrigation and crop demand were estimated; a balance was carried out to determine the area to be benefited with irrigation. Demand and contributing mass curves were then built. They allowed to determine the required reservoir volume; which was adjusted by simulating reservoir functioning.

RESULTS

Water availability estimation

The applied regression model between average monthly rainfall (Y) and topographic height (X) of neighbor and within basin stations was,

Cuadro 2. Volúmenes mensuales disponibles (Dm^3).
Table 2. Available monthly volumes (Dm^3).

Variable	Meses												Anual
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Pp	84.7	104.4	114.9	84.7	51.5	55.7	53.2	46.7	48.7	69.1	57.6	71.7	842.9
PE	324.3	335.9	378.7	214.9	253.7	249.3	255.5	239.8	237.4	294.2	256.5	298.0	3438.3
IH	349.8	364.7	412.3	334.9	267.0	260.7	268.3	250.1	246.3	313.6	269.3	318.1	3665.1
CE	312.2	383.0	411.0	300.8	184.6	205.0	193.8	168.3	175.5	248.9	209.1	257.2	3049.4
P50%	256.7	359.7	395.4	293.1	170.4	161.1	169.5	131.7	148.1	242.3	176.4	230.1	2734.5

Pp = Precipitación media mensual ponderada (mm). Estación base: "La Argelia"; PE = Volúmenes escurridos, obtenidos por el método del polinomio ecológico (Dm^3); IH = Volúmenes escurridos, obtenidos por el método del INERHI (Dm^3); CE = Volúmenes escurridos, obtenidos por el método de los coeficientes de escurrimiento (Dm^3) y P50% = Valores esperados a 50% de probabilidad (log-normal, 3 parámetros) ♣ Pp = Weighted average monthly rainfall (mm). Base station: "La Argelia"; PE = Runoff volumes, obtained from the ecological polynomial method (Dm^3); IH = Runoff volumes, obtained from the INERHI method (Dm^3); CE = Runoff volumes, obtained from the runoff coefficients method (Dm^3), and P50% = Expected values at 50% probability (log-normal, 3 parameters).

para la cuenca en su conjunto, con el propósito de compararlos con los registros obtenidos en la estación de aforo de la cuenca. El método que mejor se ajustó a los valores observados fue el de los coeficientes de escurrimiento (r^2=0.80) frente a los métodos del polinomio ecológico y del INERHI, con coeficientes de 0.70 y 0.72, respectivamente (Figura 3). Luego se aplicaron los métodos para el área de captación. Los volúmenes escurridos, obtenidos por el método de los coeficientes de escurrimiento, se ajustaron a un modelo de distribución log-normal. Los valores esperados a 50% de probabilidad, se presentan en el Cuadro 2 y en la Figura 4.

Estimación de la avenida máxima de diseño

Luego que la información pluviográfica de "La Argelia" se procesó, con base en una serie de excedentes anuales, las láminas de lluvia se agruparon en duraciones representativas de intervalos de clasificación y del análisis de las estaciones pluviométricas, obteniéndose el siguiente modelo de la tormenta de diseño para un periodo de retorno de 100 años:

$$hp = 4.8418\, d^{0.41145} \qquad (4)$$

donde *hp* es la altura de precipitación, en mm, y *d* es la duración de la lluvia, en minutos.

Se estimó el tiempo de concentración en t_c=1.455 h y se tomó una duración de tormenta de diseño aproximadamente igual, redondeándola a 90 min. Después,

$$Y = 0.477\, X - 110.02 \qquad (3)$$

The high determination coefficient obtained (r^2=0.92) showed a statistical relationship between rainfall and topographic height in this zone. Weighted average monthly rainfall (*Pp*) for the watershed contributing area was determined applying Equation 3 and using data from "La Argelia" weather station (Table 2). Methods to estimate runoff volume for the whole basin were applied to compare them with records obtained from the flow measurement station located at the basin's outlet. The method that best reflected observed values was the runoff coefficients method (r^2=0.80); when compared against the ecological polynomial (r^2=0.70) and INERHI (r^2=0.72) ones (Figure 3). Afterwards, all methods were applied to the watershed contributing area. Runoff volumes, obtained by the runoff coefficients method, were adjusted to a log-normal distribution model. Expected values at 50% probability are shown in Table 2 and Figure 4.

Estimation of design maximum flood discharge

After processing pluviographic information from "La Argelia" weather station, based on an annual excess series, rainfall depths were grouped into spans representing classification intervals and pluviometric station analysis; then, the following design storm model for a return period of 100 years was obtained:

$$hp = 4.8418\, d^{0.41145} \qquad (4)$$

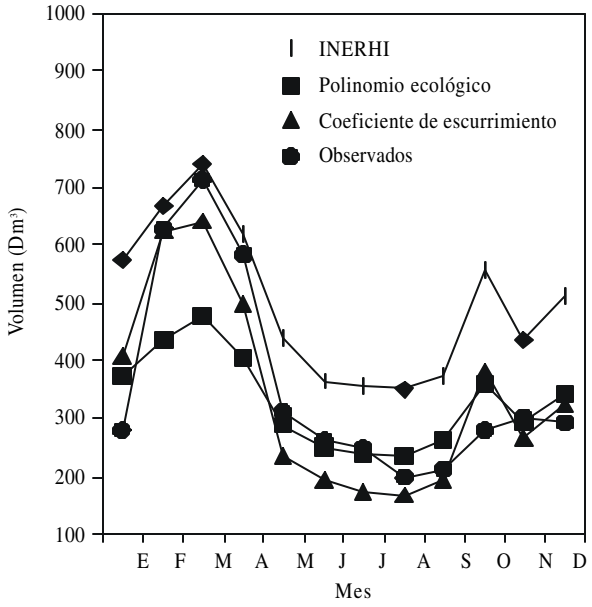

Figura 3. Volúmenes mensuales escurridos (Dm³) en toda la cuenca, calculados por los métodos indicados.
Figure 3. Monthly runoff volumes (Dm³) in the whole basin, calculated using described methods.

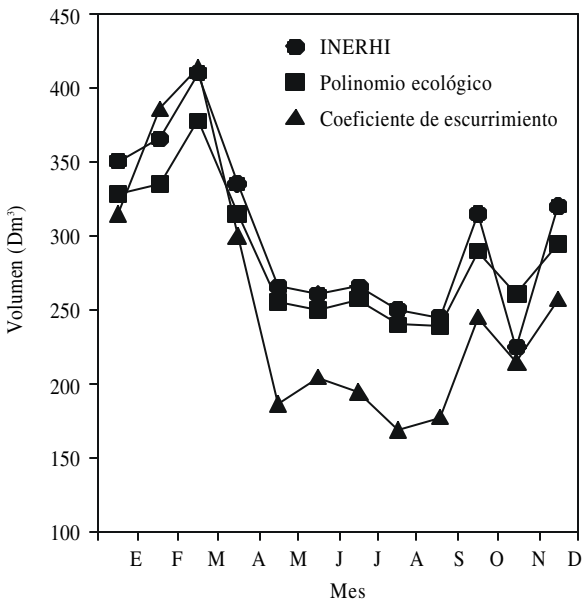

Figura 4. Volúmenes mensuales escurridos (Dm³) en el área de captación, calculados por los métodos indicados.
Figure 4. Monthly runoff volumes (Dm³) in the basin contributing area, calculated using described methods.

usando la Ecuación 4, se cuantificó la distribución de la lluvia, para cuatro intervalos de 22.5 min, para obtener el hietograma de la tormenta de diseño (Cuadro 3, Figura 5).

Una vez conocida la tormenta de diseño se definió la relación lluvia-escurrimiento, la que permitió estimar la avenida de diseño. Se determinó la lluvia en exceso para toda la duración de lluvia a través de la fórmula racional, con un coeficiente de escorrentía de C=0.6 (Springall, 1990). Después, mediante un procedimiento de prueba y error, se estimó el índice de infiltración de manera que la suma de los excesos de precipitación en cuatro intervalos resultara aproximadamente igual al exceso de lluvia anterior. El índice de infiltración resultó ϕ=8.02 mm h^{-1}. Se aplicó el método del hidrograma unitario triangular (SARH, 1978) con un tiempo y gasto al pico del triángulo de t_p=0.91 h y Q_p=6.38 h_e, donde h_e es el exceso de precipitación, y un tiempo base doble del tiempo al pico; es decir un Tb=1.83 h. Los resultados se presentan en el Cuadro 4 y en la Figura 6.

En la Figura 6 se muestran los cuatro componentes triangulares del hidrograma de la avenida de diseño y se observa que el gasto máximo de diseño es de 106 m^3 s^{-1} aproximadamente y el tiempo pico del hidrograma total es 1.33 h. De acuerdo con el método de Ven Te Chow, que sólo proporciona una estimación del gasto al pico (Aparicio, 1997), el gasto máximo para un periodo de retorno de 100 años y un tiempo de duración de la tormenta igual al tiempo de concentración (t_c=87.3 min), fue 98.66 m^3/s, valor similar al encontrado.

where *hp* is the rainfall depth in mm, and *d* is the rainfall duration in minutes.

Concentration time estimation was t_c=1.455 h, and design storm duration was rounded to 90 minutes. Afterwards, rainfall distribution was quantified using Equation 4 in four 22.5-minute intervals to obtain the design storm's hyetograph (Table 3, Figure 5).

Once the design storm was known, the rainfall-runoff relationship was defined; allowing estimation of design maximum flood. Excess rainfall for the whole duration of the rainfall period was determined by the rational formula using a runoff coefficient of C=0.6 (Springall, 1990). The infiltration index was estimated, through a trial and error procedure, in such a way that the sum of rainfall excesses in four intervals would turn out approximately equal to the previous rainfall excess. The infiltration index turned out to be ϕ=0.82 mm h^{-1}. The triangular unitary hydrograph method (SARH, 1978) was applied using triangle's peak time and discharge values of t_p=0.91 h and Q_p=6.38 h_e, respectively, where h_e is the rainfall excess; and also using a base time two-fold the triangle's peak time or Tb=1.83 h. The results are shown on Table 4 and Figure 6.

Figure 6 shows the four triangular components of the design flood's hydrograph. The maximum design flow was approximately 106 m^3 s^{-1}, and the peak time of the total hydrograph was 1.33 h. According to the Ven Te Chow method, which gives only an estimation of peak discharge (Aparicio, 1997), the maximum flow for a return period of 100 years and a storm duration equal to the

Cuadro 3. Hietograma de la tormenta de diseño.
Table 3. Design storm hyetograph.

Intervalo	Duración (min)	Altura de lluvia (mm)	Diferencia (Hietograma) (mm)
1	22.5	17.43	17.43
2	45.0	23.19	5.75
3	67.5	27.40	4.21
4	90.0	30.84	3.44

Cuadro 4. Valores del hidrograma de la avenida de diseño.
Table 4. Design discharge hydrograph values.

Hietograma		Hidrograma
Incremento de tiempo (h)	Exceso de precipitación (mm)	Gasto (m^3/s)
0.375	0.4	2.82
0.375	14.4	92.10
0.375	2.8	15.57
0.375	1.2	7.72

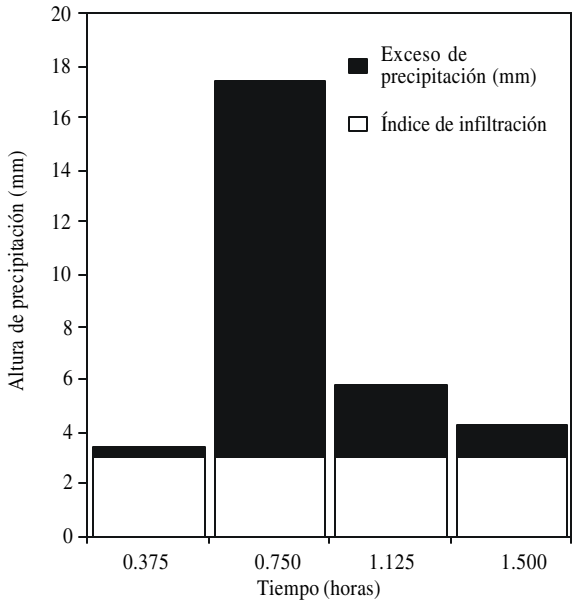

Figura 5. Hietograma de la tormenta de diseño.
Figure 5. Design storm hyetograph.

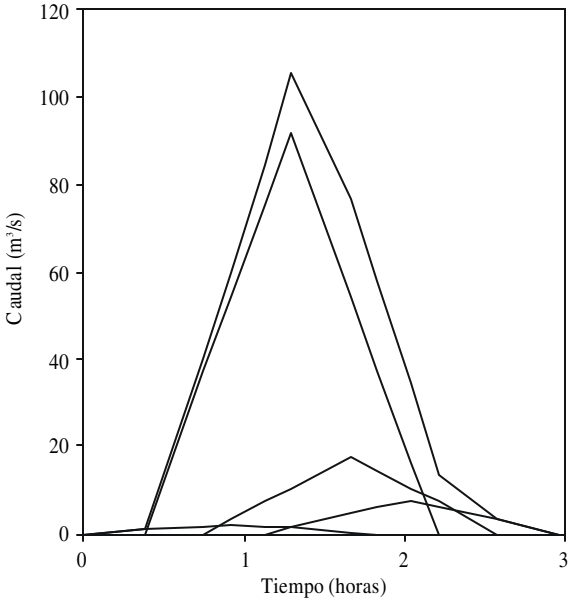

Figura 6. Avenida de diseño, donde se muestran con línea delgada, los cuatro componentes del hidrograma y, con línea gruesa, la sumatoria de los mismos.
Figure 6. Design flood discharge; where four hydrograph components are represented by thin lines; the thick line is the sum of all components.

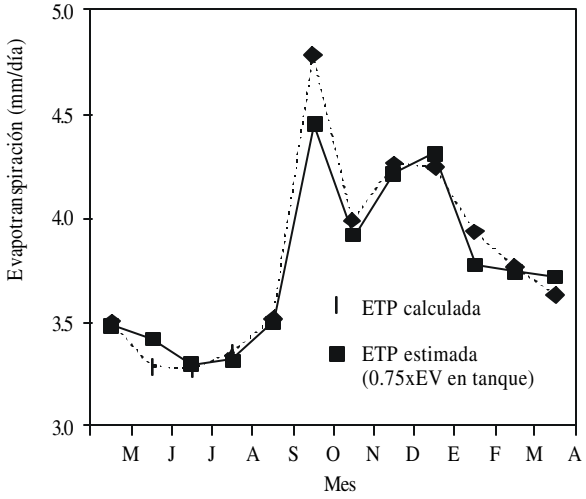

Figura 7. ETP calculada y estimada como función de la evaporación.
Figure 7. Calculated and estimated ETP as a function of evaporation.

Requerimientos de agua por los cultivos

La estación climatológica base, para el área de riego, fue la de "Catamayo". Con los valores de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y horas de brillo solar (obtenidas en función de la nubosidad), y la aplicación del CROPWAT, se determinó la ETP por el método de Penman-Monteith (Cuadro 5). De igual forma se estimó la ETP en función de la evaporación de tanque (multiplicada por el coeficiente 0.75) (Palacios, 1989). En la Figura 7 se puede observar que ambas estimaciones tuvieron un comportamiento similar.

Con la ETP calculada por Penman-Monteith, y la precipitación ponderada para la zona de riego, mediante la metodología del USDA (Smith, 1992) se estimó la precipitación efectiva. Finalmente, con información sobre la

concentration time (t_c=87.3 minutes) was 98.66 $m^3 s^{-1}$, a value similar to the one we found (106 $m^3 s^{-1}$).

Crop water requirements

"Catamayo" was the base weather station for the irrigation area. ETP was determined by the Penman-Monteith method in the CROPWAT program (Table 5) as a function of temperature, relative humidity, wind velocity, and hours of sunshine (obtained as a function of cloudiness) data. ETP was also estimated as a function of tank evaporation (multiplied by 0.75) (Palacios, 1989). Both estimations showed a similar behavior (Figure 7).

Effective rainfall was estimated using Penman-Monteith's ETP and USDA's (Smith, 1992) weighted rainfall for the irrigated zone. Finally, crop water requirements were determined utilizing information about crop cycles, crop development coefficients, root depth, and desirable moisture content at irrigation time, obtained by Palacios (1989), Tijerina (1992), and Doorenbos and

Cuadro 5. Requerimientos de riego mensual (mm mes^{-1}).
Table 5. Monthly irrigation requirements (mm $month^{-1}$).

Variable	Mes												Total
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Pr	52.0	102.8	103.5	86.0	30.1	11.3	4.1	8.7	19.0	59.3	32.3	39.6	548.8
ETP	108.5	95.7	102.3	102.0	108.5	144.0	124.0	133.3	129.0	124.0	114.0	111.6	1388
Pe	46.6	81.7	82.1	71.2	28.3	11.0	4.1	8.5	18.3	52.3	30.2	36.5	470.7
RR	36.0	0.0	0.0	20.0	209.0	410.0	299.0	274.0	266.0	159.0	240.0	178.0	2091.1

Pr = Precipitación ponderada zona de riego (mm mes^{-1}); ETP = Evapotranspiración de referencia (mm mes^{-1}); Pe = Precipitación efectiva (mm mes^{-1}); RR = Requerimientos de riego (mm mes^{-1}).

duración de los ciclos vegetativos, los coeficientes de desarrollo de los cultivos, las profundidades de las raíces y los niveles de humedad deseable al momento de aplicar los riegos, obtenida de Palacios (1989), Tijerina (1992) y Doorenbos y Pruitt (1977), se determinaron los requerimientos hídricos de los cultivos (Cuadro 5). Se calculó la lámina bruta total suponiendo una eficiencia de riego de 50%; posteriormente, de acuerdo con el área a sembrarse de cada cultivo, se determinó la lámina ponderada que finalmente, con la ayuda de los volúmenes disponibles para una probabilidad de 50% (Cuadro 2), permite calcular el área total de riego a beneficiar (Cuadro 6).

Con el área a sembrar de cada cultivo y los requerimientos de riego calculados (Cuadro 5), se determinaron los volúmenes de demanda de riego mensual. Con los valores de los volúmenes mensuales disponibles para riego y los de demanda por parte de los cultivos se construyeron las curvas masa y finalmente de determinó la capacidad útil del embalse (Cuadro 7, Figuras 8 y 9).

De acuerdo con la Figura 8 y el Cuadro 7 la diferencia máxima es: CI=801.6 Dm^3, que a su vez se considera como el volumen inicial útil. Este volumen, luego de aplicado el método del Modelo de Simulación del funcionamiento del vaso (Figura 9), fue ajustado a 950 Dm^3.

Discusión

Las cuencas agrícolas del Ecuador, como en muchos otros países en vías de desarrollo, no cuentan en general con información hidrométrica; apenas se dispone de información pluviométrica que en algunos casos es inconsistente y poco confiable.

En los países que cuentan con tecnología avanzada, se está desarrollando modelos hidrológicos, obviamente respaldados con una buena información de base. Así surgen numerosos modelos empíricos y de simulación para estimar, por ejemplo, máximas crecidas, que se pueden adaptar a las condiciones de los países en desarrollo, previa calibración, pero que requieren de abundante información hidrométrica histórica. En los países desarrollados se han preocupado, además, de conocer y controlar

Cuadro 6. Lámina bruta total y ponderada (cm mes^{-1}) y área de riego por cultivo (ha).

Table 6. Total gross and monthly weighted irrigation depths (cm $month^{-1}$) and irrigation area per crop (ha).

Cultivo	Lámina bruta (cm)	Lámina ponderada (cm)	Área (ha)	Área (%)
Tomate	104.3	41.3	110	39.6
Aguacate	68.5	18.5	75	26.9
Papaya	95.6	21.7	63	22.7
Forraje y abono verde	150.1	16.2	30	10.8

Pruitt (1977) (Table 5). Total water depth was calculated assuming an irrigation efficiency of 50%; then, weighted water depth was determined according to area per crop. This information, and data on available water volumes for a 50% probability (Table 2), allowed calculation of the total area to be irrigated (Table 6).

Monthly irrigation volume demand was determined using the area seeded per crop and calculated irrigation requirements (Table 5). Mass curves were drawn using monthly data on water volumes available for irrigation and water volumes demanded by crops. Finally, we determined the useful reservoir capacity (Table 7, Figures 8 and 9).

According to Figure 8 and Table 7, the maximum difference is CI=801.6 Dm^3; also considered as the initial useful reservoir volume. This volume was adjusted to 950 Dm^3 when applying the reservoir operation simulation model.

Discussion

Ecuador's agricultural basins, like those in many Third World countries, do not usually have hydrometric information; only pluviometric information is available; although, in some cases, it is incomplete and unreliable.

Developed countries are creating new hydrological models backed up by good quality and reliable information. Hence, empirical and simulation models are produced in developed countries to estimate, for example, maximum flood discharge. This models could be adapted, with proper calibration, to Third World countries. However, this requires large records of historic hydrometric information. Furthermore, developed countries have taken to the task of knowing and controlling water quality not only for domestic uses, but also for agricultural ones.

In developing countries like Ecuador, water quality is not as important as water quantity; particularly in the dry season, when crops need more water. Almost no hydrological models have been developed to estimate monthly runoff volumes in small agricultural basins. Models analyzed in this research fitted research conditions acceptably, but it would be extremely important to calibrate model coefficients to the study area.

As far as crop water requirements go, institutions like the Soil Conservation Service in the United States, the Food and Agriculture Organization (FAO), and the Colegio de Postgraduados in Mexico, among others, have made efforts to develop such hydrological models for small basins starting from potential evapotranspiration. The main problems about these models are the scarce availability of good quality data.

The results of this study show that runoff storage would add a total of 280 ha to agricultural production in the zone: tomato (110 ha), avocado (75 ha), papaya (63 ha), and forage (30 ha).

Cuadro 7. Curvas masa de demandas (CMD) y de aportaciones (CMA) (Dm^3).
Table 7. Demand (DMC) and contribution (CMC) mass curves (Dm^3).

Meses	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A
CMD	298.0	589.7	884.5	1051.9	1346.7	1641.6	1936.4	2231.2	2476.0	2476.0	2476.0	2713.7
CMA	170.4	331.5	501.0	632.7	780.8	1023.1	1199.5	1429.6	1686.3	2046.0	2441.4	2734.5
Diferencia	124.0	258.2	383.5	419.2	565.9	618.5	736.9	801.6	739.7	430.0	−34.6	−20.8

la calidad del agua que se utiliza no solo para usos domésticos, sino también en la agricultura.

En países en vías de desarrollo, como el Ecuador, la calidad de agua no es tan importante como lo es la cantidad mínima en época de estiaje, que justamente es cuando más agua necesitan los cultivos. Se han desarrollado pocos modelos hidrológicos para estimar volúmenes de escurrimiento mensuales en cuencas agrícolas pequeñas. Cabe mencionar que los modelos analizados en esta investigación se han acoplado aceptablemente a las condiciones de estudio, pero sería de suma importancia calibrar sus coeficientes para la región en estudio.

En lo que se refiere a los requerimientos hídricos de los cultivos, instituciones como el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y el Colegio de Postgraduados de México, entre otras, se han preocupado por desarrollar tales modelos a partir del concepto de evapotranspiración potencial. Al respecto, los principales problemas que se tienen se deben a la escasa información de buena calidad disponible.

Los resultados indican que con el almacenamiento de los escurrimientos mensuales se puede incorporar a la

In order to apply the methods used in this research, it is necessary to have experience and, above all, knowledge of the study area. It is recommended to install a discharge measurement station in the basin, with a water level recording device, and to keep gathering climatic information within the basin.

Conclusions

It is feasible to select an appropriate methodology, using climatic information analysis, for estimating irrigation possibilities in small basins that have no hydrometric and crop water consumption information to develop irrigation infrastructure in Ecuador's Andean zone. The runoff coefficients method provided the best estimate of runoff volume. The Penman-Monteith and the tank evaporation methods were similar in estimating crop water requirements. The methods used to estimate maximum flood discharge showed satisfactory results.

—End of the English version—

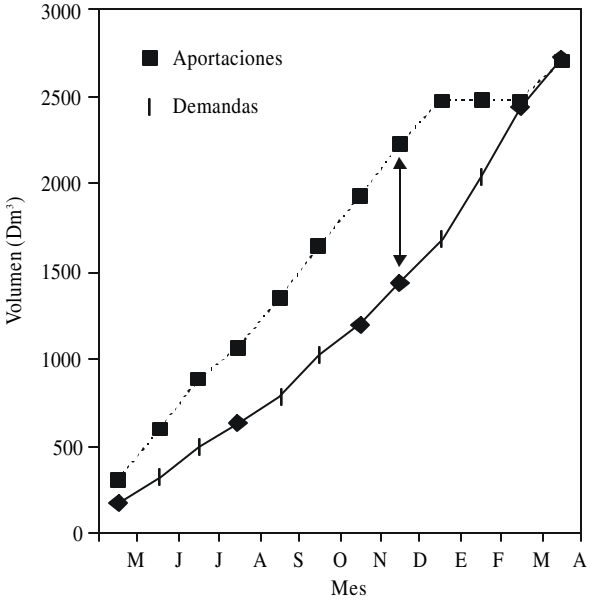

Figura 8. Curvas masa de aportaciones y demandas.
Figure 8. Demand and contribution mass curves.

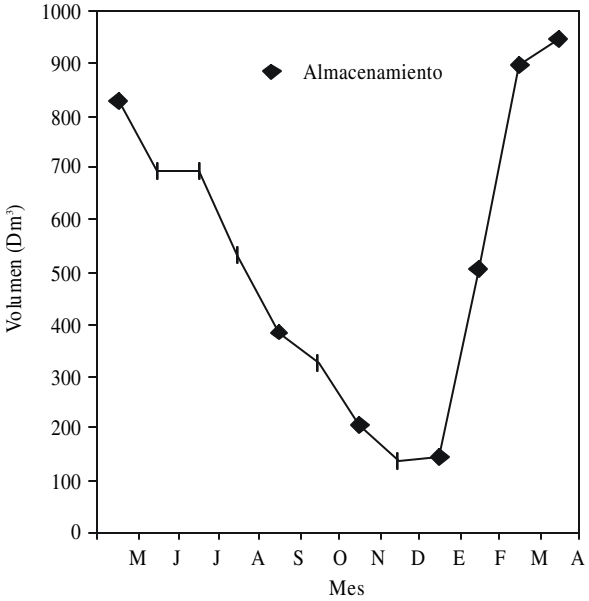

Figura 9. Funcionamiento del embalse.
Figure 9. Reservoir operation.

agricultura aproximadamente 280 ha, con cultivo de tomate (110 ha), aguacate (75 ha), papaya (63 ha) y forraje (30 ha).

Es importante mencionar que para aplicar cada uno de estos métodos utilizados en este trabajo se requiere que el profesional tenga experiencia, y sobre todo conocimiento de la zona en estudio. Finalmente se recomienda instrumentar la cuenca con una estación de aforo con limnígrafo y continuar registrando la información climatológica dentro de la cuenca.

Conclusiones

Es factible seleccionar una metodología que permita, a partir del análisis de la información climatológica, estimar el potencial hidráulico en cuencas pequeñas que no cuentan con información hidrométrica y de consumo de agua de los cultivos, con la finalidad de diseñar obras de riego en la zona andina del Ecuador. En la estimación de los volúmenes de escurrimiento, el método que produjo los mejores resultados fue el de los coeficientes de escurrimiento. El método de Penman-Monteith y el método basado en la evaporación del tanque proporcionaron resultados similares para estimar las necesidades hídricas de los cultivos. Los métodos utilizados para estimar las avenidas máximas presentaron resultados satisfactorios.

Literatura Citada

Aguilar, A., N. García y J. Rodríguez. 1995. Cálculo de Calendarios de Riego NEC-HID versión 2.0. Manual del Usuario. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Jiutepec, Morelos, México. 74 p.

Aparicio, F. 1997. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa, Noriega. 5a Reimpresión. México, D. F. 303 p.

Doorenbos, J. y W. Pruitt. 1977. La Necesidades de Agua de los Cultivos. FAO. Riego y Drenaje 24. Roma, Italia. 194 p.

FAO. 1992. Manual de Campo para la Ordenación de Cuencas Hidrográficas. Estudio y Planificación de Cuencas Hidrográficas. Roma, Italia. 185 p.

FAO. 1995. CROPWAT. A Computer Program for Irrigation Planning and Management. FAO Irrigation and Drainage Papers No. 46. Rome, Italy. 126 p.

Gómez, F. 1990. Observación y Medición de Caudales en Cuencas de la Zona Andina del Ecuador. Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos. Quito, Ecuador. 75 p.

Hendricks, J. 1994. Riego Comunitario Andino y Organización de Usuarios. Universidad Nacional de Loja UNL-SNV. Loja, Ecuador. 222 p.

INERHI (Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos). 1991. Caudales Medios Mensuales en Cuencas Agrícolas en el Ecuador. Revista del CICP. Quito, Ecuador. 68 p.

OEA. 1994. Plan Integral de Desarrollo de los Recursos Hídricos Provincia de Loja, Ecuador. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. Loja, Ecuador. 141 p.

Palacios V., E. 1989. Introducción a la Teoría de la Operación de Distritos y Sistemas de Riego. Centro de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. 482 p.

SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1978. Recomendaciones para el Diseño y Revisión de Estructuras para el Control de Avenidas. México, D. F. 296 p.

Smith, M. 1992. CROPWAT. A Computer Program for Irrigation Planning and Management. Irrigation and Drainage Paper NE46. Roma, Italia. 122 p.

Springall, R. 1968. Drenaje en Cuencas Pequeñas. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 27 p.

Springall, R.1990. Evolución de la Hidrología Superficial en México. Facultad de Ingeniería. UNAM. Ingeniería Hidráulica en México. Número Especial, 32: 39-53.

Tijerina Ch., L. 1992. Requerimientos y Calendarios de Riego. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de Méx., México. 132 p.

Universidad Nacional de Loja (UNL). 1993. Comportamiento Hidrológico de una Microcuenca Representativa del Río Catamayo. Instituto de Investigaciones. Loja, Ecuador. 218 p.